Journal of Water and Soil
Vol. 34, No. 4, Sept-Oct 2020, p. 879-895

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۴، شماره ۴، مهر – آبان ۱۳۹۹، ص. ۸۹۵-۸۷۹

مقاله علمی-پژوهشی

ارزیابی تناسب اراضی برای برنج بر مبنای مدل فائو و با استفاده از تکنیک‌های تلفیقی تصمیم‌گیری چندمعیاری فازی (مطالعه موردی: مؤسسه تحقیقات برنج آمل، استان مازندران)

سیده فاطمه نبوی[1]- نفیسه یغمائیان مهابادی[2*]- شهرام محمود سلطانی[3]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۱۳

چکیده

مسأله امنیت غذایی یکی از سیاست‌های مهم کشاورزی است و لازم است در این راستا، اراضی قابل کشت مورد ارزیابی قرار گیرند. یکی از رویکردهای اساسی جهت بهره‌برداری از منابع اراضی با کسب حداکثر بازده و حفظ کیفیت اراضی برای آینده، ارزیابی تناسب اراضی است. با توجه به اهمیت برنج به عنوان دومین محصول پرمصرف کشور و اهمیت مطالعات ارزیابی تناسب اراضی در استفاده بهینه و پایدار از اراضی، این پژوهش با هدف استفاده از تکنیک‌های تلفیقی تصمیم‌گیری چندمعیاری فازی و تعیین عمق بهینه خاک برای مطالعات ارزیابی تناسب اراضی برای کشت برنج در مزرعه پژوهشی گل‌دشت مؤسسه تحقیقات برنج کشور انجام گرفت. بدین منظور نمونه‌برداری خاک در ۵۰ نقطه و از چهار عمق مختلف انجام شد و برداشت محصول در پلاتی به وسعت یک مترمربع به مرکزیت محل‌های نمونه‌برداری خاک انجام گرفت. سپس شاخص اراضی با استفاده از روش‌های پارامتریک (ریشه دوم)، Fuzzy-AHP و Fuzzy-AHP-OWA در چهار حالت عمقی صفر تا ۲۵، صفر تا ۵۰، صفر تا ۷۵ و صفر تا ۱۰۰ سانتی‌متر مورد محاسبه و مقایسه قرار گرفتند. براساس همبستگی بین شاخص‌های اراضی محاسبه شده برای عمق‌های مختلف و عملکرد مشاهده شده برنج، بیشترین ضرایب همبستگی برای روش Fuzzy-AHP-OWA با کمیت سنج نصف (R^2=۰/۳۷) به‌دست آمد. نتایج حاصل از تناسب اراضی منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش Fuzzy-AHP-OWA نشان داد که با افزایش سطح ریسک پذیری، مناطق با درجه تناسب بالاتر مساحت بیشتری از منطقه را به خود اختصاص می‌دهند. با توجه به مشابهت نتایج بدست آمده برای عمق‌های صفر تا ۵۰ و صفر تا ۱۰۰ سانتی‌متر با نتایج خاک‌رخ شاهد در هر سه روش پارامتریک، Fuzzy-AHP و Fuzzy-AHP-OWA پیشنهاد می‌شود که استفاده از عمق صفر تا ۵۰ سانتی‌متر به منظور مطالعات ارزیابی تناسب اراضی برای برنج در منطقه‌ی گل‌دشت آمل مدنظر قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، کمیت سنج‌های مفهومی فازی، منطق فازی، میانگین وزنی مرتب شده (OWA)

مقدمه

با توجه به اینکه مهم‌ترین منبع تأمین‌کننده مواد غذایی انسان، اراضی کشاورزی می‌باشد؛ لازم است اراضی قابل کشت مورد ارزیابی قرار گیرند. از اقدامات لازم جهت بهره‌وری صحیح منابع، ارزیابی تناسب اراضی[4] است که عبارت از استفاده از منابع اراضی مطابق با استعداد و تناسب آن‌ها برای کاربری‌های گوناگون است تا با کسب حداکثر بازده، ظرفیت تولید اراضی برای استفاده های بعدی حفظ گردد (۱۰). ارزیابی تناسب اراضی توسط مدل فائو، معمول ترین رویکرد برای ارزیابی اراضی است که مبتنی بر فاکتورهای بیوفیزیکی و پارامترهای اجتماعی و اقتصادی منطقه می‌باشد (۲۰).

استفاده از منطق دو ارزشی بولین[5]، ارائه نتایج به‌صورت گسسته (۲۷)، وجود معیارهای کمی و کیفی با مقیاس های گوناگون، داشتن ساختار سلسله مراتبی، وجود گروه های ذینفع با اهداف و اولویت های گوناگون و همچنین میان‌رشته‌ای بودن ارزیابی تناسب اراضی سبب گردیده تا در سال‌های اخیر بسیاری از محققان از راهبرد تصمیم‌گیری چندمعیاری[6] که تصمیم گیری در سطوح مختلف، از انتخاب نوع

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و استادیار گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان
(*- نویسنده مسئول: Email: Yaghmaeian_na@guilan.ac.ir)
۳- استادیار موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت

DOI: 10.22067/jsw.v34i4.83830

4- Land suitability evaluation
5- Boolean
6- Multi-Criteria Decision Making; MCDM

بهره‌وری اراضی تا انتخاب معیار و در نهایت تعیین بهترین نوع بهره‌وری برای منطقه را شامل می‌شود، بهره ببرند (۳۳). فرآیند تحلیل سلسله مراتبی [1] (AHP) یکی از جامع‌ترین سیستم‌های طراحی شده برای تصمیم‌گیری چند معیاره است که می‌تواند مسئله تصمیم را بر پایه یک ساختار سلسله مراتبی به خوبی شفاف نماید (۲۴). با این وجود روش AHP مورد انتقادات زیادی قرار گرفته است؛ استفاده از مقادیر کلاسیک، مقیاس مورد استفاده در مقایسات زوجی، رتبه‌بندی غیردقیق قضاوت‌ها و گزینه‌ها، ارزیابی و انتخاب بر اساس اولویت تصمیم‌گیران از محدودیت‌های این روش به حساب می‌آید (۴۰). در طول سال‌های اخیر، روش‌های ارزیابی چند معیاره که شامل عملگرهای همپوشانی بولین و ترکیبات خطی وزن‌دار [2] می‌شوند، به‌طور فزاینده‌ای استفاده شده‌اند (۴ و ۲۱). نتایج حاصل از کاربرد روش‌های مذکور را می‌توان با استفاده از روش متوسط وزنی مرتب شده [3] (OWA) بهبود داد. در یک مسئله تصمیم‌گیری چند معیاره، افراد ریسک‌پذیر بر روی خواص مطلوب یک گزینه و افراد ریسک‌گریز بر روی خواص نامطلوب یک گزینه تأکید می‌کنند و آن‌ها را ملاک انتخاب خود قرار می‌دهند (۳۳). روش متوسط وزنی مرتب‌شده قادر به محاسبه میزان ریسک‌پذیری و ریسک‌گریزی افراد و اعمال آن در انتخاب گزینه نهایی است. این روش به‌عنوان یکی از روش‌های ترکیب در مجموعه روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره مطرح بوده و بر مبنای تئوری مجموعه های فازی توسعه پیدا کرده است (۳۸).

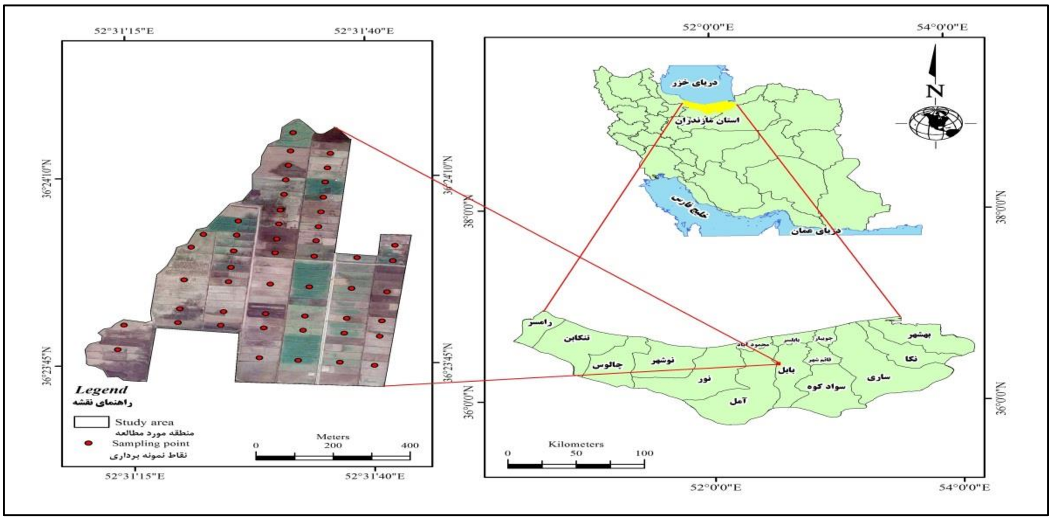
از تلفیق AHP و OWA در یک مدل می‌توان برای ایجاد ابزار تصمیم‌گیری قدرتمندتر برای حل مسائل مختلف بهره برد (۳۹). بروشاکی و مالکچوفسکی (۶) با ترکیب روش‌های چندمعیاری AHP و OWA شرایطی را مهیا کردند که امکان استفاده از عبارات مفهومی فازی در فرآیند تصمیم‌گیری وجود داشته باشد. آن‌ها پیشنهاد کردند که چنین سیستمی می‌تواند با ساده‌سازی تعریف راهبردهای تصمیم‌گیری راه حل‌های مناسبی را ارائه کند. نتایج پژوهش ایواد (۱) به منظور تعیین تناسب اراضی برای کشت برنج با استفاده از روش Fuzzy-AHP در نیجریه نشان داد که روش پیشنهادی بر پایه مجموعه‌های فازی و AHP برای ارزیابی تناسب اراضی برای برنج دقیق بوده و می‌تواند برای برنامه‌ریزی کشاورزی و استفاده بهینه از مزارع و تولید برنج مبنا قرار گیرد. گتاکو و همکاران (۱۳) نیز در ارزیابی تناسب اراضی برای برنج با استفاده از مجموعه‌های فازی و AHP در اتیوپی به نتایج مشابهی دست یافتند. دنگیز و همکاران (۱۱) در مطالعات خود جهت تعیین تناسب اراضی برای کشت برنج با استفاده از روش Fuzzy-AHP، بیشترین وزن را برای بافت خاک (۰/۲۸۴)، شاخص سازگاری را ۰/۰۹ و کلاس تناسب را S1 و S2 بدست آوردند. مالچوفسکی (۲۲) جهت مکان‌یابی مناطق مسکونی در مکزیک، ماکروپولوس و باتلر (۱۹) جهت مدیریت منابع آب شهر لندن از روش OWA در محیط GIS بهره بردند. به‌طور کلی در اغلب مطالعات صورت گرفته در ایران به ارزیابی کیفی و کمی تناسب اراضی به روش فائو پرداخته شده است. با توجه به اهمیت برنج به‌عنوان دومین محصول پرمصرف کشور بعد از گندم و اهمیت مطالعات ارزیابی تناسب اراضی در استفاده بهینه و پایدار از اراضی، پژوهش حاضر با هدف تلفیق نظریه مجموعه‌های فازی و رویکرد تصمیم‌گیری‌های چندمعیاری و تعیین عمق بهینه خاک برای مطالعات ارزیابی تناسب اراضی برای کشت برنج در مزرعه پژوهشی گل‌دشت مؤسسه تحقیقات برنج کشور انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در بخشی از مزرعه پژوهشی گل‌دشت معاونت مؤسسه تحقیقات برنج کشور، با فاصله ۲۱ کیلومتری از شهرستان بابل، واقع بین طول‌های جغرافیایی ″۳۰ ′۳۰ °۵۲ تا ″۳۰ ′۳۲ °۵۲ شرقی و عرض‌های جغرافیایی ″۳۰ ′۲۳ °۳۶ تا ″۳۰ ′۲۴ °۳۶ شمالی به مساحت ۷۲ هکتار انجام شد (شکل ۱). بر اساس اطلاعات ایستگاه هواشناسی آمل، منطقه مورد مطالعه دارای میانگین دمای سالانه ۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد، حداقل مطلق دما ۸- درجه سانتی‌گراد، حداکثر مطلق دما ۳۹/۲ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالیانه ۶۶۳/۶ میلی‌متر برای دوره آماری ۱۵ ساله (۱۳۹۵-۱۳۸۰) می‌باشد. رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک، به‌ترتیب یودیک و ترمیک (۳) و سیمای اراضی منطقه، دشت دامنه‌ای با شیب کمتر از ۱ درصد است. متوسط ارتفاع منطقه از سطح دریا، ۷۶ متر می‌باشد و کاربری اصلی آن کاربری زراعی با تیپ بهره‌وری برنج می‌باشد.

در این پژوهش براساس الگوی نمونه‌برداری شبکه‌ای منظم با ابعاد ۷۰ در ۱۳۰ متر، مختصات جغرافیایی ۵۰ نقطه مشاهداتی به‌دست آمد. انتخاب چنین شبکه‌ای بر مبنای دستیابی به تراکم مطلوب نقاط با توجه به وسعت محدوده مورد مطالعه و ابعاد کرت‌های مزارع پژوهشی صورت گرفت. پس از تعیین موقعیت نقاط مشاهداتی در منطقه توسط سیستم موقعیت‌یاب جهانی [4] (GPS)، نمونه‌برداری خاک از چهار عمق صفر تا ۲۵، ۲۵ تا ۵۰، ۵۰ تا ۷۵ و ۷۵ تا ۱۰۰ سانتی‌متر انجام گرفت.

1- Analytical Hierarchy Process; AHP
2- Weighted Linear Combination; WLC
3- Ordered Weighted Average; OWA
4- Global Positioning System; GPS



شکل۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری

Figure 1- Location of the study area and sampling points

با توجه به وسعت منطقه مطالعاتی (۷۲ هکتار) و بر مبنای مطالعات خاکشناسی تفصیلی (۲۹)، سه خاک‌رخ در منطقه مطالعاتی حفر و تشریح شدند و یکی از آن‌ها به‌عنوان خاک‌رخ شاهد انتخاب شده و از تمامی افق‌های ژنتیکی آن نمونه‌برداری شد. لازم به ذکر است که نتایج تناسب کیفی خاک‌رخ شاهد با نتایج حاصل از نقاط مشاهداتی برای هر کدام از چهار عمق مطالعاتی مقایسه شدند. جهت تعیین نیازهای اقلیمی و نیازهای زمین‌نما و خاکی برای برنج از جداول پیشنهادی سایس و همکاران (۳۲) و گیوی (۱۴) استفاده شد. پس از هوا خشک نمودن نمونه‌های خاک و عبور از الک دو میلی‌متری، تجزیه های آزمایشگاهی مورد نیاز براساس نیازهای خاکی برنج انجام گرفت (۳۰).

به منظور اندازه‌گیری عملکرد واقعی، برداشت محصول در پلاتی به وسعت یک مترمربع به مرکزیت محل‌های نمونه‌برداری خاک انجام شد. این داده‌ها با عملکرد کل هر کرت مربوط به محل نمونه‌گیری صحت سنجی گردید. برای محاسبه عملکرد پیش‌بینی شده در هر نقطه مشاهداتی ابتدا شاخص خاک برای هر نقطه بدست آمد. پس از محاسبه شاخص خاک، مقادیر پتانسیل تولید منطقه در شاخص خاک عمق مربوطه ضرب گردید. برای محاسبه پتانسیل تولید از مدل فائو (۱۱) استفاده شد (رابطه ۱).

$$Y = \frac{0.36\text{bgm. KLAI. Hi}}{\left(\frac{1}{L}\right) + 0.25\text{Ct}} \quad (۱)$$

در رابطه فوق Y تولید پتانسیل محصول (کیلوگرم در هکتار)، bgm حداکثر شدت تولید زیست توده ناخالص (کیلوگرم در هکتار در ساعت)، KLAI ضریب تصحیح معادله براساس شاخص سطح برگ، Hi شاخص برداشت، L طول فصل رشد و Ct ضریب تنفس می‌باشد. به‌منظور تعیین سطح مدیریت، شاخص مدیریت (MI)[1] محاسبه گردید (۱۴). لازم به ذکر است در پژوهش حاضر برای تعیین عمق بهینه خاک به‌منظور ارزیابی تناسب اراضی برای برنج، محاسبات شاخص خاک و تناسب اراضی برای هر نقطه مشاهداتی در چهار حالت عمقی صفر تا ۲۵، صفر تا ۵۰، صفر تا ۷۵ و صفر تا ۱۰۰ سانتی‌متر به طور جداگانه انجام گرفت.

روش Fuzzy-AHP

در این روش از توابع عضویت کندل (۳۴)، بر اساس احتیاجات برنج، برای تعیین درجه عضویت هر یک از خصوصیات اراضی در کلاس‌های تناسب اراضی استفاده گردید و نتایج در ماتریسی به نام ماتریس خصوصیات (R) قرار داده شد. تأثیرات نسبی هر خصوصیت یا کیفیت زمین (معیار ارزیابی) بر تولید برنج را می توان به صورت فاکتورهای وزنی نشان داد که در ماتریس اوزان (W) قرار می‌گیرند. بدین منظور، با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، وزن هر یک از خصوصیات اراضی مؤثر در میزان تولید محصول محاسبه شد. برای این منظور، از مقیاس نُه نقطه‌ای (۲۷) که اقدام به درجه‌بندی نسبی ارجحیت‌ها برای دو معیار می‌کند، استفاده شد. به‌منظور تعیین کلاس نهایی تناسب اراضی برای هر نقطه مشاهداتی مطابق رابطه ۲، ماتریس اوزان و ماتریس خصوصیات با استفاده از نظریه مجموعه‌های فازی با یکدیگر ترکیب شدند (۳۵).

1- Management Index; MI

$$E= W \circ R \quad (۲)$$

در این رابطه (°)، عملگر ضرب فازی است که به جای حداقل، تی- نرم مثلثی[۱] و به جای حداکثر، تی- کونرم مثلثی[۲]، ایجاد می‌شود (۲۵). عملگر ضرب فازی نشان‌دهنده یک عملگر ریاضی به نام ترکیب است؛ ولی به جای جمع نمودن حاصل‌ضرب‌های عناصر هر دو ماتریس، اقدام به تعیین بزرگترین مقدار موجود می‌کند (۳۵). در ادامه برای برآورد شاخص اراضی، مجموع عناصر ماتریس نهایی برابر یک قرار داده شده (نرمال کردن) و عناصر جدید، به ترتیب در متوسط شاخص کلاس‌های مختلف تناسب اراضی، ضرب گردید (رابطه۳) (۳۴).

$$LI = \sum E0_j \times A_j \quad (۳)$$

در این رابطه LI شاخص اراضی، $E0_j$ مقدار نرمال شده ماتریس E، A_j میانگین حداقل و حداکثر شاخص‌ها در کلاس مورد نظر j است.

روش Fuzzy-AHP-OWA

هرچند که فرآیند AHP امکان استفاده مستقیم از آراء کارشناسان را فراهم می‌آورد و می‌توان از آن برای برآورد وزن معیار (w_j) استفاده کرد؛ اما امکان کنترل سطح ریسک و مقدار موازنه در این روش وجود ندارد. به‌عبارت دیگر استفاده از آن برای حل هر نوع مسئله‌ای منجر به نتایجی با سطح ریسک پایین ($Orness \rightarrow 0$) و جبران کنندگی بالا ($Trade\ off \rightarrow 1$) می‌شود که همه معیارها را براساس وزن آنها دخالت می‌دهد. در مقابل در روش OWA با توجه به وجود دسته دومی از وزن‌ها به نام وزن‌های ترتیبی (U_j) امکان کنترل سطح ریسک و جبران‌پذیری فراهم می‌شود و می‌توان یک تعادل میان ریسک تصمیم و جبران‌پذیری آن ایجاد کرد. روش AHP-OWA به تنهایی قادر به استفاده از آرای کیفی و قضاوت‌های زبانی کارشناسان نبوده ولی استفاده از کمیت سنج‌های فازی به همراه AHP-OWA امکان استفاده از آرای کمی و کیفی تحلیل‌گران را فراهم می‌سازد (۳۳). این نوع روش ها را ارزیابی چند معیاری هدایت شده توسط کمیت‌سنج‌های فازی می‌نامند (۳۹). در حقیقت روش OWA پلی بین تصمیم‌گیری‌های کلاسیک و تصمیم‌گیری چند مشخصه‌ای مکانی و سامانه‌های فازی به حساب می‌آید و در آن مفهوم جدیدی تحت عنوان وزن‌های ترتیبی فراهم آمده است که متفاوت از وزن‌های معیار می‌باشد. وزن‌های معیار به معیارهای مورد استفاده اختصاص پیدا می‌کند در حالی‌که وزن های ترتیبی به ارزش‌های معیارها برای هر موقعیت مکانی اختصاص پیدا می‌کند؛ به عبارتی وزن‌های ترتیبی شیوه ترکیب معیارهای وزن‌دار را کنترل کرده (۲۲) و به موقعیت مکانی مشخص اختصاص پیدا می‌کند.

در این پژوهش وزن‌های معیار (w_j) از روش AHP و وزن‌های ترتیبی (U_j) با استفاده از کمیت سنج‌های فازی طبق رابطه ۴ بدست آمد (۲۲). کمیت سنج‌های فازی امکان تبدیل عبارت های زبانی، به عبارت‌های ریاضی را فراهم می‌سازند (۲۳). در این پژوهش از کمیت سنج‌های نسبی به نام کمیت سنج‌های منظم افزایشی[۳] استفاده شده است (جدول ۱).

$$U_j = (\sum_{k=1}^{j} u_k)^{\alpha} - (\sum_{k=1}^{j-1} u_k)^{\alpha} \quad (۴)$$

بنابراین با معلوم بودن وزن معیارها (w_j) و وزن‌های ترتیبی (U_j)، عملگر OWA (رابطه ۵) به صورت رابطه زیر قابل تعریف است:

$$OWA_i = \sum_{j=1}^{n} \left((\sum_{k=1}^{j} u_k)^{\alpha} - (\sum_{k=1}^{j-1} u_k)^{\alpha} \right) z_{ij} \quad (۵)$$

که در آن $Z_{i1} \geq Z_{i2} \geq \cdots \geq Z_{in}$ با مرتب کردن ارزش‌ها (مقادیر) معیارهای $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}$ به‌دست می‌آید و u_j همان وزن معیار است که بر اساس ترتیب z_{ij}ها مرتب‌سازی شده است.

عملگر OWA شامل دو مشخصه اصلی درجه Orness و Trade off است که محل عملگر را در بازه پیوسته‌ای که از کمیت‌سنج "همگی[۴]" تا " حداقل یکی[۵]" حاصل می‌شود، نشان می‌دهد (۳۹). درجه Orness یا ریسک‌پذیری، موقعیت عملگر OWA را در بین روابط And (مینیمم) و Or (ماکزیمم) نشان می‌دهد (رابطه ۶) و رابطه ۷ درجه Trade off، میزان رابطه‌ی موازنه‌ای جایگشتی بین معیارهای گزینش را نشان می‌دهد (۸).

$$Orness = 1 - \left(\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^{n} (n-i) \times u_i\right)$$
$$0 \leq Orness \leq 1 \quad (۶)$$

$$Trade\ off = 1 - \left(\frac{n}{n-1} \times \sum_{i=1}^{n} (u_j - \frac{1}{n})^2\right)$$
$$0 \leq Trede\ off \leq 1 \quad (۷)$$

n عبارت از تعداد معیار و u_j وزن‌های ترتیبی می‌باشد. لازم به ذکر است که تمام محاسبه‌های مورد نیاز برای انجام این تحقیق در محیط نرم‌افزار اکسل و تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS ver16 و پهنه‌بندی با استفاده از روش کریجینگ معمولی در محیط نرم‌افزاری Arc GIS 10.3 صورت گرفت.

1- Triangular norm
2- Triangular conorm
3- RIM
4- ALL
5- At Least one

جدول ۱- کمیت‌سنج‌های زبانی مورد استفاده و α متناظر
Table 1- Used Linguistic quantifiers and α corresponding

کمیت سنج زبانی Linguistic quantifiers	حداقل یکی At least one	اندک Few	بعضی Some	نصف Half	زیاد Many	اکثریت Most	همگی All
α	0.0001	0.1	0.5	1	2	10	1000

نتایج و بحث

جدول ۲ برخی ویژگی‌های آماری متغیرهای خاکی مورد مطالعه، اطلاعات آماری عملکرد واقعی، عملکرد پیش‌بینی شده و شاخص مدیریت برای برنج در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. تفاوت چندانی بین مقادیر میانگین رس از سطح به عمق وجود ندارد، اما بالا بودن درصد این ذره باعث ایجاد خاک‌هایی با بافت رسی و سیلت‌رسی در منطقه شده است. مقادیر زیاد رس در خاک نقش یک لایه غیر قابل نفوذ را برای جلوگیری از نفوذ آب و ایجاد شرایط غرقاب در شالیزار بازی می‌کند (جدول ۲). از آنجائی‌که عملیات مدیریت زراعی خاک‌های شالیزاری شامل تسطیح، احداث مرز به‌منظور جمع‌آوری و نگهداری آب در مزرعه، گلخرابی، نگهداری چند سانتی‌متر آب در بالای سطح خاک به مدت ۳ تا ۵ ماه (طول دوره رشد گیاه)، زهکشی و خشک کردن مزرعه در زمان برداشت به بافت خاک بستگی دارد (۲۰)، بر این اساس بافت‌های سنگین در خاک‌های شالیزاری مطلوب بوده و شرایط بهینه برای رشد و نمو برنج را فراهم می‌سازد. مقادیر حداکثر کربن آلی از مقادیر نسبتاً زیاد آن در منطقه حکایت دارد. با افزایش عمق خاک، میانگین کربن آلی کاهش می‌یابد. کشت برنج تحت شرایط غرقاب می‌تواند عامل مهمی در نگهداشت کربن آلی از طریق تجزیه کمتر مواد آلی در شرایط غرقاب نسبت به شرایط هوازی و تشکیل کمپلکس اکسیدهای آهن با مواد آلی باشد (۱۶). وجود میانگین واکنش خاک به مقدار ۷/۳ در شالیزارهای منطقه ممکن است به علت غرقاب بودن شالیزارها در فصل زراعی باشد. معمولاً در اکثر خاک‌ها، چند هفته پس از غرقاب شدن، واکنش خاک بین ۶/۷ تا ۷/۲ در خاک و بین ۶/۵ تا ۷ در محلول خاک تثبیت می گردد. به طور کلی غرقاب شدن اراضی، واکنش خاک را به حدود خنثی می رساند. این امر به‌دلیل حضور مقدار کافی یون‌های آهن سه ظرفیتی (فریک) قابل احیا و تبدیل آن به یون‌های آهن دو ظرفیتی (فرو) و وجود مواد آلی قابل هضم برای تغذیه باکتری های بی‌هوازی در شرایط اسیدی و تجزیه مواد آلی و در نتیجه تولید اسیدهای آلی، دی‌اکسید کربن و اسید کربنیک در شرایط قلیایی صورت می‌گیرد (۱۰). تفاوت در قابلیت هدایت الکتریکی در سطح و عمق خاک ناچیز بوده به‌طوری که در افق های سطحی مقادیر بالاتر مشاهده گردید. افزایش میزان قابلیت هدایت الکتریکی در سطح خاک را می‌توان به تبخیر از سطح نسبت داد.

تغییرپذیری ویژگی‌های خاک را می‌توان از طریق بررسی ضریب تغییرپذیری[1] آن‌ها بررسی نمود. طبق نظر ویلدینگ (۳۷) درصورتی‌که مقدار ضریب تغییرات صفر تا ۱۵درصد، ۱۵ تا ۳۵ درصد و بیش‌تر از ۳۵ درصد باشد، به‌ترتیب بیانگر تغییرپذیری کم، متوسط و زیاد می‌باشد. بر این اساس، درصد سیلت، رس و واکنش خاک در هر چهار عمق مطالعاتی دارای تغییرپذیری کم، هدایت الکتریکی، درصد سدیم تبادلی و کربن آلی دارای تغییرپذیری متوسط و درصد شن دارای تغییرپذیری زیاد می‌باشد. ایوبی و همکاران (۲) بیان کردند که تغییرپذیری ویژگی‌های خاک ممکن است تحت تأثیر عوامل داخلی (عوامل تشکیل دهنده خاک) مانند مواد مادری و عوامل خارجی (مانند عوامل مدیریتی) باشد. pH و درصد شن به ترتیب دارای کمترین و بیشترین ضریب تغییرات هستند. در پژوهش‌های صورت گرفته توسط شوکلا و همکاران (۲۹)، براس و دی گرویتر (۵) و لیو و همکاران (۱۷) کم‌ترین ضریب تغییرات برای pH خاک به دست آمد. به طور کلی pH خاک از ویژگی‌های پایدار خاک به شمار می‌رود (۷). بیشترین مقدار ضریب تغییرات درصد شن را شاید بتوان به اثر ترکیبی عوامل مدیریتی و عوامل ذاتی خاک در منطقه مرتبط دانست. مهدوی فیروزآبادی و همکاران (۱۸) استدلال مشابهی در این زمینه ارئه داده‌اند.

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که میانگین عملکردهای پیش‌بینی شده در چهار عمق مطالعاتی، تفاوت چندانی با یکدیگر و با میانگین عملکرد واقعی نداشتند. بین پتانسیل تولید برنج در منطقه که برابر با ۵/۵ تن در هکتار محاسبه شده است و میانگین عملکرد واقعی که برابر با ۳/۹ تن در هکتار است، تفاوت وجود دارد. با توجه به اینکه میانگین شاخص مدیریت منطقه ۱/۳ و سطح مدیریت بالا می‌باشد (۳۲)، علت احتمالی این موضوع، می‌تواند ویژگی‌های خاکی باشد که باعث کاهش مقدار عددی شاخص خاک می‌شود. تغییرپذیری عملکرد پیش‌بینی شده و واقعی به‌ترتیب کم و متوسط می‌باشد. بر اساس اطلاعات محلی، بازدیدهای میدانی و نتایج ناشی از پرسشنامه‌های پرشده در منطقه مطالعاتی (نتایج نشان داده نشده است) و با توجه به اینکه تغییرپذیری عملکرد واقعی علاوه بر تغییرات ویژگی‌های خاک متاثر از عواملی چون اثرات نابرابر مصرف آب در مزرعه و کاربرد غیر یکنواخت کود و سموم در طول فصل رشد می‌باشد؛ به علاوه تغییرپذیری متوسط شاخص مدیریت در منطقه مورد مطالعه، می‌تواند تغییرپذیری متوسط عملکرد واقعی را توجیه کند.

1- Coefficient of variation; CV

جدول ۲- خلاصه آماری ویژگی‌های خاکی مطالعه شده و عملکرد محاسبه شده در منطقه مورد مطالعه
Table 2- Summary statistics of studied soil properties and calculated yield in the study area

متغیر Variable	عمق (cm) Depth	میانگین Mean	میانه Median	واریانس Variance	حداقل Min	حداکثر Max	انحراف معیار Standard deviation	ضریب تغییرات(٪) Coefficient of variation
شن Sand (%)	0-25	5.94	6.00	7.07	2.00	20.00	2.66	45
	0-50	8.74	7.37	20.53	3.25	21.13	4.53	52
	0-75	9.69	8.41	27.60	3.00	22.00	5.25	54
	0-100	10.13	8.87	30.51	3.00	23.28	5.52	54
سیلت Silt (%)	0-25	39.92	40.00	10.64	31.00	46.00	3.26	8
	0-50	36.85	36.12	12.10	30.25	44.13	3.47	9
	0-75	35.80	35.50	13.36	29.67	43.50	3.65	10
	0-100	35.36	34.88	13.61	29.25	42.88	3.68	10
رس Clay (%)	0-25	54.14	54.00	12.12	48.00	62.00	3.48	6
	0-50	54.41	54.00	16.32	47.00	61.50	4.04	7
	0-75	54.50	54.42	17.07	46.67	62.00	4.13	8
	0-100	54.50	54.31	17.66	46.00	61.44	4.20	8
اسیدیته خاک pH	0-25	7.37	7.35	0.02	7.10	7.66	0.14	2
	0-50	7.38	7.38	0.01	7.17	7.66	0.11	1
	0-75	7.39	7.41	0.01	7.15	7.67	0.11	1
	0-100	7.39	7.42	0.01	7.15	7.68	0.11	1
هدایت الکتریکی EC (dS/m)	0-25	0.81	0.77	0.03	0.44	1.58	0.19	23
	0-50	0.73	0.73	0.01	0.47	1.21	0.13	18
	0-75	0.71	0.69	0.02	0.46	1.48	0.15	21
	0-100	0.70	0.67	0.03	0.46	1.78	0.18	26
سدیم تبادلی ESP (%)	0-25	2.80	2.70	0.42	1.68	5.23	0.65	23
	0-50	2.62	2.62	0.47	1.87	5.18	0.68	26
	0-75	1.78	1.67	0.20	1.26	3.77	0.45	25
	0-100	2.54	2.27	0.69	1.67	5.62	0.83	33
کربن آلی OC (%)	0-25	1.41	1.42	0.05	1.00	1.95	0.22	16
	0-50	1.10	1.10	0.04	0.48	1.54	0.21	19
	0-75	1.00	1.00	0.03	0.55	1.38	0.17	17
	0-100	0.95	0.95	0.02	0.59	1.30	0.15	16
عملکرد پیش‌بینی شده Predicted Yield (ton/h)	0-25	3.88	3.95	0.09	3.26	4.38	0.30	7
	0-50	3.93	4.01	0.09	3.31	4.57	0.30	7
	0.75	3.53	3.53	0.09	2.90	4.18	0.31	8
	0-100	3.07	3.06	0.13	2.20	3.73	0.36	11
عملکرد واقعی Actual Yield (ton/h)	–	3.94	2.07	1.08	2.82	6.6	1.04	26
شاخص مدیریت Management Index	–	1.32	1.17	0.18	0.86	2.68	0.42	32

جـدول ۳ مـاتریس مقایسـات جفـت بـه جفـت بـه همـراه وزن معیارهای ارزیابی برای برنج در روش Fuzzy-AHP را نشان می‌دهد. اوزان بدست آمده نشان می‌دهد که بافت خاک و مقدار کـربن آلـی از اثرگذارترین خصوصیات اراضی بـر تولیـد بـرنج در منطقـه مطالعـاتی هستند. یکی از ویژگی‌های روش AHP، تعیین مقدار عددی سازگاری قضاوت‌هاست. AHP دارای مکانیزمی است که توسط آن جامعیـت و سازگاری مقایسات مشخص می‌شود و در نهایت نشان می‌دهد که تـا چه اندازه می‌توان به اولویت بدست آمـده اعتمـاد نمـود (۲۸). نسـبت سازگاری[1] محاسبه شده در این پژوهش، ۰/۰۳۷ بدسـت آمـد. هرگـاه نسبت سازگاری مساوی و کمتر از ۰/۱ باشد، سازگاری قابل مقبـول و معقولی در مقایسات جفت به جفت وجـود دارد در غیـر ایـن صـورت، مقادیر اولیه مقایسات جفت به جفت می‌بایستی مورد تجدید نظر قـرار گیرند (۲۴)؛ بنـابراین مقایســه‌هـای انجـام شـده در ایـن پـژوهش از سازگاری منطقی برخوردار هستند.

1- Consistency Ratio; CR

جدول ۳- ماتریس مقایسات جفت به جفت و وزن مربوط به معیارها
Table 3- Pairwise Comparison Matrix and weight of the criteria

متغیر Variable	شاخص اقلیم (CI) Climatic Index	عمق آب زیرزمینی Water table depth	بافت Texture	هدایت الکتریکی EC	اسیدیته خاک pH	سدیم تبادلی ESP	کربن آلی OC	وزن Weight
شاخص اقلیم(CI) Climatic Index	1	4	1/6	3	2	2	1/4	0.119
عمق آب زیرزمینی Water table depth	1/4	1	1/7	1/2	1/3	1/3	1/5	0.035
بافت Texture	6	7	1	6	4	4	2	0.368
هدایت الکتریکی EC	1/3	2	1/6	1	1/2	1/2	1/5	0.050
اسیدیته خاک pH	1/2	3	1/4	2	1	1	1/4	0.083
سدیم تبادلی ESP	1/2	3	1/4	2	1	1	1/4	0.083
کربن آلی OC	4	5	1/2	5	4	4	1	0.263

با استفاده از وزن‌های معیار که با استفاده از روش AHP به‌دست آمده‌اند (جدول ۳) و کمیت‌سنج‌های فازی (جدول ۱)، وزن‌های ترتیبی با استفاده از رابطه (۴) برای نقاط مشاهداتی در چهار عمق مطالعاتی و خاک‌رخ شاهد محاسبه شد. برای نمونه، محاسبات مربوط به یکی از نقاط مشاهداتی در عمق صفر تا ۱۰۰ سانتی‌متر با استفاده از کمیت‌سنج‌های (α=۰/۰۰۰۱، α=۱ و α =۱۰۰۰) در جدول ۴ ارائه شده است.

نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد با افزایش مقدار α و کاهش درجه خوش‌بینی، وزن‌های ترتیبی کوچکتر و کوچکتری به ارزش‌های بالای معیارها اختصاص پیدا می‌کند. در حالیکه وزن‌های ترتیبی بزرگتر به ارزش‌های عددی پایین‌تر در همان موقعیت اختصاص پیدا می‌کند. کمیت‌سنج فازی (α=۰/۰۰۰۱) At least one به عنوان خوش‌بینانه‌ترین سناریو در زنجیره کمیت‌سنج‌های فازی مطرح می‌باشد. به عبارتی نتایج تصمیم‌گیری منجر به بیشترین ریسک و جبران‌پذیری پایین می‌شود. در این سناریو، محلی که یکی از معیارهای مورد استفاده را برآورده سازد، انتخاب می‌شود. درجه تناسب بدست آمده با استفاده از کمیت‌سنج ۰/۰۰۰۱ (خوش‌بینانه) دارای بیشترین مقدار درجه تناسب (۹۸/۵۱) و کلاس تناسب S1 (کاملا مناسب) می‌باشد. به سمت کمیت‌سنج ۱۰۰۰ (بدبینانه) مقدار درجه تناسب کاهش پیدا کرده و در نهایت در کمیت‌سنج ۱۰۰۰، درجه تناسب ۴۸/۹۸ و کلاس S3 (تناسب بحرانی) برای نقطه مشاهداتی مورد نظر بدست آمده است. این سناریو منجر به بدترین حالت تصمیم‌گیری شده و به صورت ریسک ناپذیر و بدون هیچ‌گونه موازنه‌ای صورت گرفته و در آن محلی که تمامی معیارهای مورد استفاده را برآورده سازد، مورد انتخاب قرار می‌گیرد (۲۵). مقادیر مابین این دو حالت منجر به نتایج متفاوت با سطح ریسک و جبران‌پذیری متفاوت می‌شوند. جدول ۵ کلاس تناسب کیفی خاک‌رخ شاهد را با استفاده از روش Fuzzy-AHP-OWA نشان می‌دهد که با افزایش مقدار کمیت‌سنج فازی α، کلاس تناسب از S1 به S3 تغییر یافته است. طالعی و همکاران (۳۳) کاهش مساحت کلاس‌های تناسب کیفی بالا برای کشت گندم در شهرستان میانه را با افزایش مقدار α بیان کردند. مالچوفسکی (۲۲) و رجبی و همکاران (۲۴) در ارزیابی تناسب اراضی برای احداث مجتمع‌های صنعتی و مناطق مسکونی به نتایج مشابهی دست یافتند.

شکل ۲ نقشه‌های بدست آمده از روش Fuzzy-AHP-OWA، با استفاده از سه کمیت‌سنج فازی را نشان می‌دهد که با استفاده از تخمین‌گر کریجینگ معمولی در محیط GIS تهیه شدند. از آنجایی که در سناریوهای مرتبط با α کمتر، ارزش بیشتر به موقعیت‌های دارای مقدار عددی بالا داده می‌شود و بالعکس در سناریوهای مرتبط با α بیشتر، ارزش بیشتر به موقعیت‌های دارای مقدار عددی کمتر داده می‌شود؛ بنابرین از α=۰/۰۰۰۱ به سمت α=۱۰۰۰ تناسب منطقه برای کشت برنج کاهش می‌یابد.

جدول ٤- درجه تناسب بدست آمده توسط روش Fuzzy-AHP-OWA با استفاده از کمیت‌سنج‌های مختلف

Table 4- Suitability degree of obtained in Fuzzy-AHP-OWA method by using different quantifiers

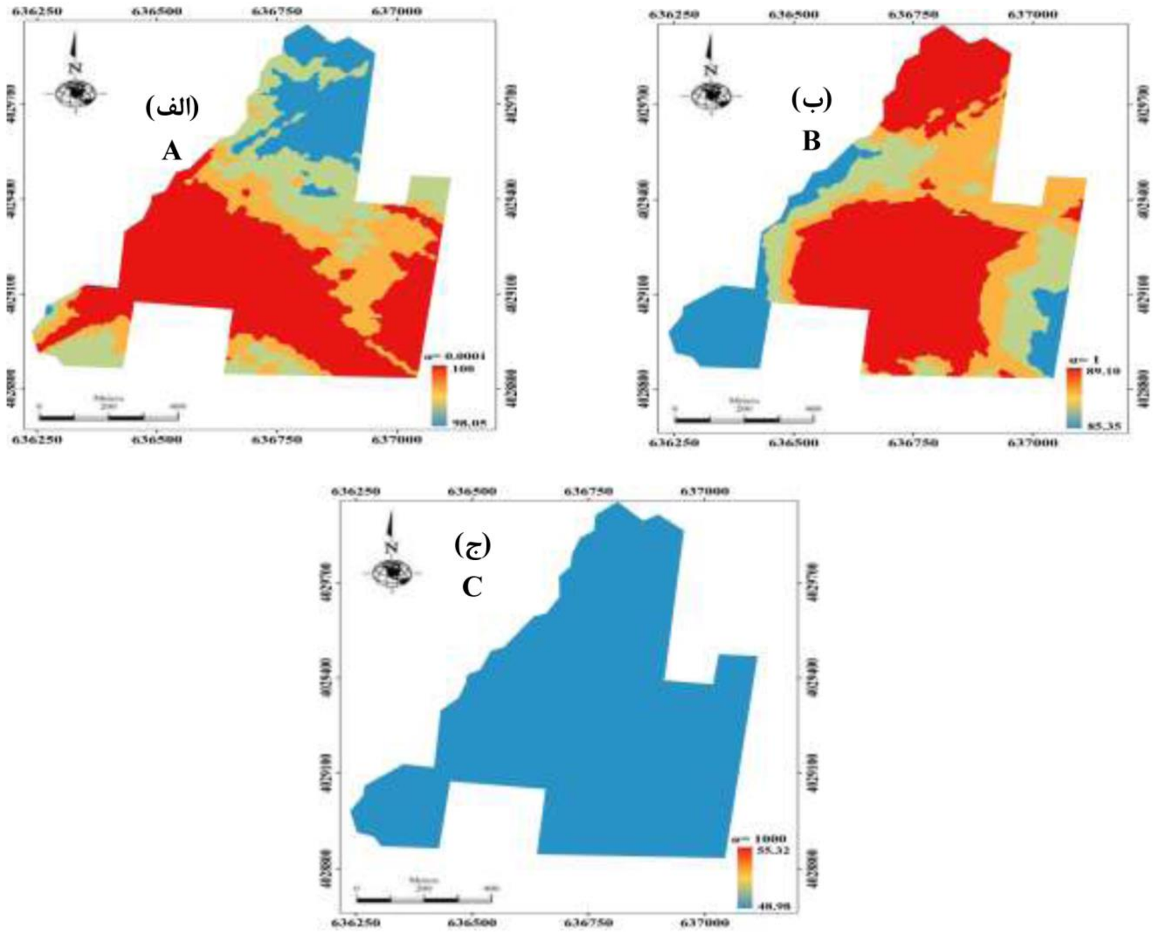
معیار criteria j	درجه تناسب معیار Ordered suitability degree aij	وزن معیار criteria Weight Wj	درجه تناسب Suitability degree Zij	وزن معیار مرتب شده Ordered criteria Weight uj	$(\sum_{k=1}^{j} u_k)^a$	$(\sum_{k=1}^{j} u_k)^a - (\sum_{k=1}^{j-1} u_k)^a$	$((\sum_{k=1}^{j} u_k)^a - (\sum_{k=1}^{j-1} u_k)^a) z_{ij}$
(a) At least one (α=0.0001)							
شاخص اقلیم (Climatic Index)	48.98	0.119	98.51	0.083	1.000	1.000	98.51
عمق آب زیرزمینی (Water table depth)	85.00	0.035	97.99	0.083	1.000	0	0
اسیدیته خاک (pH)	93.52	0.368	93.52	0.368	1.000	0	0
کربن آلی (OC)	69.04	0.050	90.00	0.263	1.000	0	0
درصد سدیم تبادلی (ESP)	98.51	0.083	85.00	0.035	1.000	0	0
هدایت الکتریکی (EC)	97.99	0.083	64.09	0.050	1.000	0	0
بافت (Texture)	90.00	0.263	48.98	0.119	1.000	0	0
Σ						1.000	**98.510**
(b) Half (α=1)							
شاخص اقلیم (Climatic Index)	48.98	0.119	98.51	0.083	0.083	0.083	8.176
عمق آب زیرزمینی (Water table depth)	85.00	0.035	97.99	0.083	0.166	0.083	8.133
اسیدیته خاک (pH)	93.52	0.368	93.52	0.368	0.534	0.368	34.414
کربن آلی (OC)	69.04	0.050	90.00	0.263	0.797	0.263	23.670
درصد سدیم تبادلی (ESP)	98.51	0.083	85.00	0.035	0.832	0.035	2.975
هدایت الکتریکی (EC)	97.99	0.083	64.09	0.050	0.882	0.050	3.452
بافت (Texture)	90.00	0.263	48.98	0.119	1.000	0.118	5.780
Σ						1.000	**86.599**

ادامه جدول ٤- درجه تناسب بدست آمده توسط روشFuzzy-AHP-OWA با استفاده از کمیت‌سنج‌های مختلف
Continued Table 4- Suitability degree obtained in Fuzzy-AHP-OWA method by using different quantifiers

معیار criteria j	درجه تناسب معیار Ordered suitability degree aij	وزن معیار Criteria Weight Wj	درجه تناسب Suitability degree Zij	وزن معیار مرتب شده Ordered criteria Weight uj	$(\sum_{k=1}^{j} u_k)^a$	$(\sum_{k=1}^{j} u_k)^a - (\sum_{k=1}^{j-1} u_k)^a$	$((\sum_{k=1}^{j} u_k)^a - (\sum_{k=1}^{j-1} u_k)^a) z_{ij}$
(c) All (α=1000)							
شاخص اقلیم (Climatic Index)	48.98	0.119	98.51	0.083	0	0	0
عمق آب زیرزمینی (Water table depth)	85.00	0.035	97.99	0.083	0	0	0
اسیدیته خاک (pH)	93.52	0.368	93.52	0.368	0	0	0
کربن آلی (OC)	69.04	0.050	90.00	0.263	0	0	0
درصد سدیم تبادلی (ESP)	98.51	0.083	85.00	0.035	0	0	0
هدایت الکتریکی (EC)	97.99	0.083	69.04	0.050	1.000	0	0
بافت (Texture)	90.00	0.263	48.98	0.119	1.000	1.000	48.980
Σ					1.000	1.000	**48.980**

جدول ۵- کلاس تناسب کیفی با استفاده از روش Fuzzy-AHP-OWA
Table 5- Qualitative suitability class using Fuzzy-AHP-OWA method

کمیت‌سنج (α) Quantifiers	α=0	α=0.1	α=0.5	α=1	α=2	α=10	α=1000
کلاس Class	S1	S1	S1	S1	S1	S2	S3



شکل ۲- پهنه‌بندی شاخص اراضی با روش Fuzzy-AHP-OWA، با استفاده از کمیت‌سنج‌های فازی (الف)؛ α=/۰۰۰۱، (ب)؛ α=۱، (ج)؛ α=۱۰۰۰
Figure 2- Land index mapping using Fuzzy-AHP-OWA method by fuzzy quantifiers (A) α = 0.0001, (B) α = 1, (C) α = 1000

نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که درصد هم‌خوانی نتایج نقاط مشاهداتی با خاک‌رخ شاهد برای روش پارامتریک، برای دو عمق (صفر تا ۵۰ و صفر تا۱۰۰ سانتی‌متر) بالاترین مقدار و تقریبا یکسان می‌باشد. بررسی ویژگی‌های خاکی نقاط مشاهداتی (جدول ۲) در عمق ۵۰- ۷۵ سانتی‌متر نشان می‌دهد که اکثر نقاط مشاهداتی دارای EC و ESP کمتری (درجه تناسب بهتر) نسبت به عمق‌های صفر تا ۵۰ و ۱۰۰- ۷۵ سانتی‌متر می‌باشند. این موضوع می‌تواند دلیل همخوانی کمتر (۷۶ درصد) نتایج مربوط به عمق صفر تا ۷۵ سانتی‌متر در مقایسه با عمق‌های صفر تا ۵۰ و صفر تا۱۰۰ سانتی‌متر باشد. نتایج مقایسه کلاس‌های تناسب کیفی روش Fuzzy-AHP بر اساس اطلاعات خاک‌رخ شاهد با دیگر نقاط مشاهداتی در هر چهار عمق مورد مطالعه نشان می‌دهد که ۳ عمق صفر تا ۵۰ ، صفرتا ۷۵ و صفر تا ۱۰۰ سانتی‌متر بیشترین هم‌خوانی را با کلاس خاک‌رخ شاهد داشته‌اند. نتایج نقاط مشاهداتی با استفاده از روش Fuzzy-AHP-OWA در هر چهار عمق مورد بررسی، هم‌خوانی کامل (۱۰۰ درصد) را با نتایج خاکرخ شاهد داشته است. لازم به ذکر است که کلاس تناسب کیفی اراضی بر اساس اطلاعات مربوط به خاک‌رخ شاهد با استفاده از روش پارامتریک و Fuzzy-AHP، به ترتیب S3 و S2 به دست آمدند.

جدول ۶- نتایج مقایسه کلاس تناسب کیفی بر اساس اطلاعات خاک‌رخ شاهد با دیگر نقاط مشاهداتی برای هر یک از روش‌های پارامتریک، Fuzzy-AHP و Fuzzy-AHP-OWA در چهارعمق مورد مطالعه

Table 6- Comparison of qualitative sutibality class calculated based on the representative soil profile information with the rest of the observation points for each parametric, Fuzzy-AHP and Fuzzy-AHP-OWA methods in each of the four studied depth

روش Method	عمق Depth (cm)	تعداد نقاط مشاهداتی دارای کلاس یکسان با خاک‌رخ شاهد Number of observation points have the same class as the representative soil profile	درصد همخوانی نقاط مشاهداتی با کلاس خاک‌رخ شاهد Compatible percentage of observation points with the class of representative soil profile
Parametric	0-25	43	86
	0-50	50	100
	0-75	38	76
	0-100	49	98
Fuzzy-AHP	0-25	43	86
	0-50	50	100
	0-75	49	98
	0-100	50	100
Fuzzy-AHP-OWA	0-25	50	100
	0-50	50	100
	0-75	50	100
	0-100	50	100

نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد که عملکرد پیش‌بینی شده برای هریک از عمق‌های مورد مطالعه با شاخص‌های اراضی محاسبه شده به روش‌های پارامتریک، Fuzzy AHP و Fuzzy-AHP-OWA، همبستگی مثبت و معنی دار دارد. همچنین عملکرد واقعی به جز عمق صفر تا ۲۵ سانتی‌متر برای سه عمق دیگر چنین رابطه‌ای را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر می‌توان گفت عمق صفر تا ۲۵ سانتی‌متر مورد استفاده برای محاسبات تناسب اراضی، رابطه معنی‌داری با عملکرد واقعی منطقه مطالعاتی نشان نداده است. با توجه به درصد همخوانی بالا و مشابه برای عمق‌های صفر تا ۵۰ و صفر تا ۱۰۰ سانتی‌متر با نتایج خاک‌رخ شاهد (جدول ۶) و نیز نظر به گل‌خرابی اکثر شالیزارهای منطقه تا عمق ۵۰ سانتی متر و همچنین هزینه و زمان‌بر بودن مطالعات تناسب اراضی، پیشنهاد می‌شود که استفاده از عمق صفر تا ۵۰ سانتی‌متر به منظور مطالعات ارزیابی تناسب اراضی برای برنج در منطقه‌ی گل‌دشت آمل مدنظر پژوهش‌گران قرار گیرد.

به منظور قضاوت در مورد دقت و اعتبار روش های ارزیابی تناسب اراضی، براساس همبستگی بین شاخص‌های اراضی محاسبه شده برای عمق‌های مختلف حاصل از هر کدام از روش‌های پارامتریک، Fuzzy-AHP و Fuzzy-AHP-OWA با عملکرد مشاهده شده برنج، بیشترین ضرایب همبستگی برای Fuzzy-AHP-OWA (α=۱) (R^2=۰/۳۶۷) به‌دست آمد (نتایج مربوط به سایر کمیت سنج‌های فازی برای چهار حالت عمقی به دلیل تعداد زیاد آن‌ها در جدول ۷ نشان داده نشده است). این مسئله به دلیل موازنه جایگشتی (جبران کنندگی) بالا بین معیارهای مورد ارزیابی در کمیت‌سنج نصف (α=۱) می‌باشد. به عبارت دیگر در این سناریو تناسب پایین یک گزینه از نظر یک معیار با تناسب بالای آن از نظر معیارهای دیگر جبران گردیده و باعث همبستگی بیشتر با مقادیر عملکرد زارع که بیانگر واقعیت زمینی است، می‌گردد. کارآیی پایین در ابتدا و انتهای زنجیره کمیت‌سنج‌های مفهومی فازی (α =۰/۰۰۰۱, α =۱۰۰۰) به دلیل عدم جبران بین معیارها و روش انتخاب گزینه‌ها می‌باشد به این صورت که در سناریو خوش‌بینانه (α=۰/۰۰۰۱) یک گزینه براساس یک درجه تناسب بالا قابل توجه در یک معیار و بدون توجه به تناسب ضعیف آن در ارتباط با سایر معیارها به عنوان بهترین گزینه شناخته می‌شود در حالی‌که در سناریو بدبینانه (α=۱۰۰۰) این موضوع حالت عکس دارد و یک گزینه به واسطه تناسب پایین در ارتباط با حتی یک معیار رد می‌شود. که این نتایج در اغلب موارد با واقعیت موجود در منطقه مورد مطالعه مطابقت ندارد (شکل ۳).

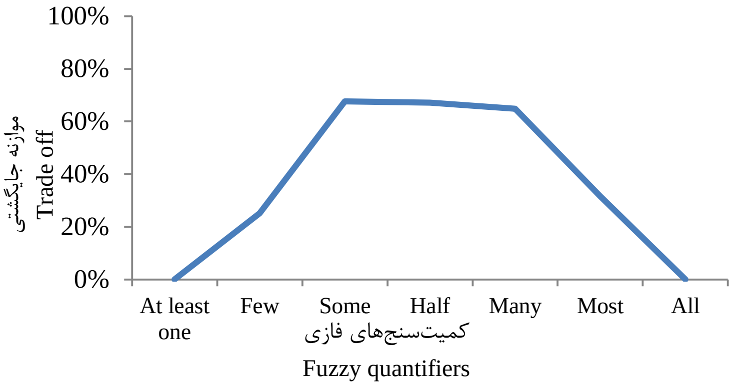
جدول ۷- ماتریس همبستگی بین عملکردها (واقعی و پیش‌بینی شده) و شاخص‌های اراضی محاسبه شده به روش‌های مختلف

Table 7- The correlation matrix between the yields (actual and Predicted) and calculated land index using different methods

	AY	PY25	PY50	PY75	PY100	LI25	LI50	LI75	LI100	LI_{fa}.25	LI_{Ffa}50	LI_{fa}75	LI_{fa}100	LI_{fao}25	LI_{fao}50	LI_{fao}75	LI_{fao}100
AY	1																
PY25	0.260	1															
PY50	0.239	0.970**	1														
PY75	0.282*	0.934**	0.974**	1													
PY100	0.295*	0.630**	0.589**	0.563**	1												
LI25	0.262	1	0.934**	0.922**	0.614**	1											
LI50	0.285*	0.934**	1	1	0.557**	0.923**	1										
LI75	0.282*	0.937**	0.975**	1	0.561**	0.924**	1	1									
LI100	0.295*	0.630**	0.589**	0.563**	1	0.614**	0.557**	0.561**	1								
LI_{fa}.25	0.136	0.361*	0.329*	0.342*	0.293*	0.280*	0.335*	0.346*	0.293*	1							
LI_{fa}50	0.313*	0.351*	0.340*	0.336*	0.336*	0.320*	0.345*	0.318*	0.317*	0.351*	1						
LI_{fa}75	0.338*	0.379**	0.386**	0.359*	0.364**	0.347*	0.360*	0.365**	0.363**	0.353*	0.358**	1					
LI_{fa}100	0.340*	0.349*	0.388**	0.393**	0.381**	0.323*	0.393**	0.392**	0.400**	0.373**	0.450**	0.450**	1				
LI_{fao}25	0.367**	0.531**	0.432**	0.476**	0.411**	0.688**	0.477**	0.481**	0.411**	0.360*	0.361*	0.391**	0.367**	1			
LI_{fao}50	0.366**	0.414**	0.481**	0.617**	0.361**	0.497**	0.619**	0.617**	0.361**	0.349*	0.336*	0.367**	0.387**	0.576**	1		
LI_{fao}75	0.367**	0.344*	0.407**	0.546**	0.304*	0.441**	0.547**	0.548**	0.304*	0.314*	0.343*	0.374**	0.374**	0.589**	0.983**	1	
LI_{fao}100	0.367**	0.414**	0.417**	0.476**	0.424**	0.471**	0.478**	0.482**	0.424**	0.359*	0.314*	0.374**	0.497**	0.526**	0.717**	0.746**	1

AY؛ عملکرد واقعی، PY؛ عملکرد پیش‌بینی شده، ۲۵؛ عمق صفر تا ۲۵ سانتی‌متر، 50؛ عمق صفر تا۵۰ سانتی‌متر، 75؛ عمق صفر تا ۷۵ سانتی‌متر ، 100؛عمق صفر تا۱۰۰ سانتی‌متر ، LI؛ شاخص اراضی (پارامتریک)، fa؛ تحلیل سلسله مراتبی فازی، fao؛ Fuzzy-AHP-OWA با کمیت‌سنج فازی (α=1)، *؛ معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد، **؛ معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد

AY; Actual Yield, PY; Predicted Yield, 25; zero to 25 cm depth, 50; zero to 50 cm depth, 75; zero to 75 cm depth, 100; zero to 100 cm depth , LI; Land Index (Parametric), Fa; Fuzzy Hierarchy Process, Fao; Fuzzy-AHP-OWA with fuzzy quantifiers ($\alpha = 1$), *; Significant at 95 percent confidence level, **; Significant at 99 percent confidence level



شکل ۳- موازنه‌ی جایگشتی در بین معیارهای مورد استفاده در سطوح مختلف تصمیم‌گیری مربوط به نقاط مشاهداتی

Figure 3- Trade-off among the criteria at different levels of decision making for observation points

نتیجه‌گیری

ارزیابی تناسب اراضی برای محصولات کشاورزی نیازمند تلفیق اطلاعات از رشته‌های مختلف علوم بوده و تناسب انواع کاربری‌های اراضی را با در نظر گرفتن معیارهای گوناگون برای منطقه مورد نظر ارزیابی می‌کند. در این پژوهش از قابلیت‌های ترکیبی تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره برای ارزیابی تناسب اراضی بر مبنای مدل فائو استفاده شد. مدل OWA امکان کنترل سطح جبران پذیری و ریسک پذیری را در یک فرآیند تصمیم‌گیری فراهم می‌آورد. اما از آنجا که OWA نمی‌تواند بخوبی AHP از اولویت‌های مستقیم کارشناسان بهره‌گیری کند، از تلفیق آن‌ها برای ارزیابی تناسب اراضی بهره‌گیری شد. استفاده از کمیت‌سنج‌های مفهومی فازی به همراه AHP-OWA باعث شد تا علاوه بر استفاده از آرای کمی کارشناسان و کنترل ابعاد تصمیم‌گیری، امکان وارد کردن اطلاعات کیفی تحلیل‌گران نیز در مسئله تصمیم فراهم شود. اوزان بدست آمده نشان می‌دهد که بافت خاک و مقدار کربن آلی از اثرگذارترین خصوصیات اراضی بر تولید برنج در منطقه مطالعاتی هستند. باتوجه به نتایج حاصل بیشترین ضرایب همبستگی بین شاخص‌های اراضی محاسبه شده برای عمق‌های مختلف و عملکرد مشاهده شده برنج، برای روش Fuzzy-AHP-OWA (α=۱) به دست آمد. این مسئله به دلیل موازنه جایگشتی (جبران کنندگی) بالا بین معیارهای مورد ارزیابی در کمیت‌سنج نصف (α=۱) می‌باشد. با توجه به مشابهت نتایج بدست آمده برای عمق‌های صفر تا ۵۰ و صفر تا ۱۰۰ سانتی‌متر با نتایج خاک‌رخ شاهد در هر سه روش پارامتریک، AHP و Fuzzy-AHP-OWA و نیز نظر به پرهزینه و زمان‌بر بودن مطالعات تناسب اراضی، پیشنهاد می‌شود که استفاده از عمق ۵۰-۰ سانتی‌متر به منظور مطالعات ارزیابی تناسب اراضی برای برنج در منطقه‌ی گل‌دشت آمل مدنظر قرار گیرد.

نتایج نهایی حاصل از تناسب اراضی منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش Fuzzy-AHP-OWA نشان داد که با افزایش سطح ریسک پذیری، مناطق با درجه تناسب بالاتر مساحت بیشتری از منطقه را به خود اختصاص می‌دهند و با کاهش میزان ریسک، مناطق با درجه تناسب پایین‌تر مساحت بیشتری از منطقه را شامل می‌شوند. نتایج این پژوهش پتانسیل بالای مدل OWA در مدل‌سازی مسائل پیچیده تصمیم‌گیری چند معیاری در دنیای واقعی و کارآیی این روش را در مدیریت‌های مختلف از جمله علوم طبیعی با توجه به سطح ریسک‌پذیری نشان می‌دهد.

منابع

1- Ayoade M. 2017. Suitability assessment and mapping of Oyo State, Nigeria, for rice cultivation using GIS. Theoretical and Applied Climatology 129(3-4): 1341-1354.

2- Ayoubi S., Mohammad Zamani S., and Khormali F. 2009. Predicting wheat yield using Soil properties using principal component analysis. Iranian Journal of Soil and Water Research 49(1): 51-57. (In Persian)

3- Banai M.H. 1998. A map of the soil and moisture regime of Iranian soils. Soil and Water Research Institute, Tehran.

4- Beedasy J., and Whyatt D. 1999. Diverting the tourists: spatial decision support system for tourism planning on a developing Island. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 1(3-4): 163-174.

5- Brus D.J., and De Gruijter J.J. 2012. A hybrid design-based and model-based sampling approach to estimate the temporal trend of spatial means. Geoderma 173-174: 241-248.

6- Boroushaki S., and Malczewski J. 2008. Implementing an extension of the analytical hierarchy process using

ordered weighted averaging operators with fuzzy quantifiers in Arc GIS. Computers & Geosciences 34(4): 399–410.

7- Bouma J. and Finke P.A. 1993. Origin and nature of soil resource variability. In: Robert P.C., Rust R.H. and Larson W.E. (Eds.), Soil Specific Crop Management. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI, pp. 3-14.

8- Carlsson C., Fuller R. and Fuller S.1997. OWA operators for doctoral student selection problem. In R. R. Yager & J. Kacprzyk (Eds.), The Ordered Weighted Averaging Operator: Theory, Methodology and Applications. London: Kluwer Academic Publisher. pp. 67-178.

9- Chou T. Hsu C.L and Chen C.M. 2008. A fuzzy multi-criteria decision model for international tourist hotels location selection, International Journal of Hospitality Management 27(2): 293-301.

10- Cheng Y.Q., Yang L.Z., Cao Z.H., and Yin S. 2009. Chrono sequential changes of selected pedogenic properties in paddy soils as compared with non-paddy soils. Geoderma 151(1-2): 31-41.

11- Dengiz O., Ozyazici M.A., and Saglam M. 2013. Multi-criteria assessment and geostatistical approach for determination of rice growing suitability sites in Gokirmak catchment. Paddy and Water Environment 13(1):1-10.

12- FAO. 2007. Land evaluation: towards a revised framework. Rome: Food and Agricultural Organization of the United Nations.

13- Getachew T.A. and Besufekad S.A. 2015. Land suitability analysis for rice production: A GIS based multi-criteria decision approach. American Journal of Geographic Information System 4(3): 95–104.

14- Givi J.1997. Qualitative evaluation of land suitability for crops and orchards, Scientific adviser of Soil and Water Research Institute and Faculty member, Faculty of Agriculture, Shahre Kord University. Journal No. 1015. (In Persian)

15- Khiddir S.M. 1986. A statistical approach in the use of parametric systems applied to the FAO framework for land evaluation, Ph. D. thesis state university, Ghent. Belgium, 141 P.

16- Kogel-Knabner I., Amelung W., Cao Z., Fiedler S., Frenzel P., Jahn R., Kalbitz K., Kolbl A., and Schloter M. 2010. Biogeochemistry of paddy soils. Geoderma 157(1-2):1-14

17- Liu X., Xu J., and Zhang M. 2007. Spatial variability of soil available Zn and Cu in paddy rice fields of China. Environmental Geology 55(7): 1569–1576.

18- Mahdavi Firoozabadi M., Esfandiarpour Brojeni I., Bagheri Bodaghabadi M. and Kamali, A. 2016. Comparison of two fuzzy methods to determine soil depth in land suitability studies for wheat, Journal of Soil Management and Sustainable Production 6(3): 101-116. (In Persian with English abstract)

19- Makropoulos C.K., and Butler D. 2006. Spatial ordered weighted averaging: incorporating spatially variable attitude towards risk in spatial multi-criteria decision making. Environmental Modelling and Software 21(1): 69–84.

20- Malekuti M.J, and Kawosi M. 2006. Balanced nutrition of rice. First Edition. Senate Publications, Tehran. (In persian)

21- Malczewski J. 2004. GIS based land-use suitability analysis: a critical overview. Progress in Planning 62(1): 3–65.

22- Malczewski J. 2006. Ordered weighted averaging with fuzzy quantifiers, GIS-based multicriteria evaluation for land use suitability analysis. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 8(4): 270–277.

23- Meng Y., Malczewski J., and Boroushaki S. 2011. A GIS-based multicriteria decision analysis approach for mapping accessibility patterns of housing development sites: a case study in Canmore, Alberta, Journal of Geographic Information System 3(1): 50-61.

24- Rajabi M., Mansourian A., and Talei M. 2011. Comparing study between AHP, AHP-OWA and fuzzy AHP-OWA multi-Criteria decision making methods for site selection of residential complexes in Tabriz-Iran. Journal of Environmental Studies 37(57): 1-16. (In Persian with English abstract)

25- Ruan D. 1990. A critical study of widely used fuzzy implication operators and their influence on the inference rules in fuzzy expert systems. Ph.D. dissertation, State University of Gent, Belgium.

26- Saaty T.L. 1980. The analytic hierarchy process. McGraw–Hill, New York.

27- Salehi M.H., and Khademi H. 2008. Basics of Soil Surveying. Academic Jihad. Esfahan. (In Persian)

28- Shariff A.M.,Wan M.D. 2008. Land suitability study using GIS and MCDA in agriculture activities: a land suitability study for harumanis mango in perlis using GIS and MCDA. GIS Bulletin 2: 33–43.

29- Shukla M.K., Lal R., and Ebinger M. 2004. Principal component analysis for predicting corn biomass and grain yields. Soil Science 169(3): 215224.

30- Soil Survey Staff. 1996. Soil Survey Laboratory Methods Manual. Report No. 42, USDA, NRCS, NCSS, USA.

31- Sys C., Van Ranst E., and Debaveye J. 1991. Land Evaluation. Part II: methods in land evaluation. Agricultural Publication No. 7. General Administration for Development Cooperation, Brussels, Belgium.

32- Sys C., Van Ranst E., Debaveye J., and Beernaert F. 1993. Land Evaluation. Part III: methods in land evaluation.

Publication No. 7. General Administration for Development Cooperation, Brussels, Belgium.
33- Taleai M., Soleimani H., and Farajzadeh M. 2013. Evaluation of land suitability for dryland wheat cultivation based on FAO model using fuzzy-AHP-OWA technique. Journal of Water and Soil 28(1): 156-139. (In Persian with English abstract)
34- Tang H., Van Ranst E., and Sys C. 1992. An approach to predict land production potential for irrigated and rainfed winter wheat in Pinan County, China. Soil Technology 5(3): 213-224.
35- Van Ranst E., Tang H., Groenemans R., and Sinthurahat S. 1996. Application of fuzzy logic to land suitability for rubber production in peninsular Thailand. Geoderma 70(1): 1-19.
36- WebsterR., and Oliver M.A. 2007. Geostatistics for Environmental Scientists. John Wiley and Sons, Chichester.
37- Wilding L. 1985. Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil surveys, Soil spatial variability. Workshop, pp. 166-194.
38- Yager R.R. 1988. On ordered weighted averaging aggregation operators in Multi criteria decision making IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics 18(1): 183-190.
39- Yager R.R. 1996. Quantifier guided aggregation using OWA operators, International Journal of Intelligent Systems 11(1): 49–73.
40- Yang K., Koike T., and Ye B. 2006. Improving estimation of hourly, daily, and monthly solar radiation by importing global data sets, Agricultural and Forest Meteorology 137(1-2): 43–55.

Journal of Water and Soil
Vol. 34, No. 4, Sept-Oct 2020, p. 879-895

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۴، شماره ۴، مهر – آبان ۱۳۹۹، ص. ۸۹۵-۸۷۹

Land Suitability Evaluation Based on the FAO Model and Fuzzy Multi-Criteria Decision Making Techniques for Rice (Case Study: Rice Institute Amol, Mazandaran Province)

S.F. Nabavi[1]- N. Yaghmaeian Mahabadi[2]*- Sh. Mahmoud Soltani[3]

Received: 11-11-2019
Accepted: 03-08-2020

Introduction: highly increases in population growth rate, in particular in developing countries, cause high pressure on agricultural resources. In north of Iran, the pressures are compounded by restricted rice paddy fields. Reliable and relevant land suitability evaluations are vital requirements for land use policy and decision making to support sustainable rural development. Therefore, it is necessary to employ and compare the classic model (FAO), new release technique (multi-criteria decision making strategy) and the capabilities of fuzzy systems to assess land suitability. In recent years, multi-criteria evaluations including Boolean overlay operators and weighted linear combination methods have been increasingly used. Also, using the Ordered Weighted Average (OWA) method can improve the above-mentioned techniques. The OWA method is able to calculate the degree of risk taking and risk aversion of individuals and apply them to the selection of the final option. Therefore, the purposes of the current study were to explore the most reliable method of land suitability evaluation for rice by using integrated fuzzy decision making and determine the optimum depth of soil for quantitative land suitability evaluation for rice production in Amol, Mazandaran province.

Materials and Methods: Two-hundred soil samples from 50 observation points at four depths of 0 to 25, 25 to 50, 50 to 75 and 75 to 100 cm with a constant interval were selected. After crop harvesting and taking soil samples from four depths in 50 observation points, and from the genetic horizons of representative pedon excavated in the region, the parameters needed for land suitability evaluation of rice were measured. Then, land suitability classes were calculated using the parametric (square root), Fuzzy-AHP and Fuzzy-AHP-OWA methods and were compared in four depths from 0 to 25, 0 to 50, 0 to 75 and 0 to 100 cm. In Fuzzy-AHP method, Kandel membership functions were used to determine the membership degree and analytic hierarchy process (AHP) was used to determine the weight of each of the effective land properties in crop yield. In Fuzzy-AHP-OWA method, criteria weights were obtained from AHP method and ordered weights using linguistic fuzzy quantifiers.

Results and Discussion: The results showed significant difference between the potential yield (5.5 t/ha) and the average of actual yield (3.9 t/ha) in the study area. With respect to the same and acceptable agricultural management of all plots, this difference might be due to soil limitations and subsequently a decrease in the numerical value of the soil index. Except for 0 to 25 cm soil depth, actual yield for the other soil depths showed a positive significant correlation with all calculated land indices by parametric, Fuzzy AHP and Fuzzy-AHP-OWA methods. The compatibility percentage between the representative pedon and observation points was remarkable for 0-50 and 0-100 cm depths in three studied methods. Considering time and cost consuming for land evaluation, this finding shows that 0 to 50 cm soil depth information might be a relevant alternative for the optimal depth to evaluate land suitability for rice in studied paddy fields. The results of the Fuzzy-AHP method showed that soil texture and organic carbon content were the most important soil properties for rice production. The results of land evaluation using Fuzzy-AHP-OWA method showed that with increasing the levels of risk (decreasing the value of α from 1000 to 0.0001), areas with a higher suitability degree occupy greater area. This can be explained by the fact that the strategy associated with the fuzzy quantifier all (α=1000) represents the worst-case scenario (the lowest criterion value is assigned to each location) and under the strategy associated with the fuzzy quantifier, at least one (α=0.0001), the land suitability pattern is composed of the best possible outcomes. The highest correlation coefficients (R^2= 0.37) were obtained for Fuzzy-AHP-OWA (α=1) based on correlation between actual yields and calculated land indices for different depths of each parametric method,

1 and 2- Ph.D. Student and Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, respectively.
(*- Corresponding Author Email: Yaghmaeian_na@guilan.ac.ir)
3- Assistant Professor, Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht
DOI: 10.22067/jsw.v34i4.83830

Fuzzy-AHP and Fuzzy-AHP-OWA. This is due to the high trade-off among the evaluation criteria in the half fuzzy quantifier (α=1).

Conclusion: The proposed approach based on Fuzzy-AHP-OWA has great potential to model land use suitability evaluation problem. Half fuzzy quantifier is introduced as the best scenario using Fuzzy-AHP-OWA method for rice land suitability evaluation. This is due to the high trade-off among the evaluation criteria in this quantifier. Given the fact that the land suitability studies are often costly and time consuming, the land suitability evaluation by using 0-50 cm results might be a relevant alternative for the optimal soil depth required for land suitability evaluation in paddy fields.

Keywords: Analytical hierarchy process (AHP), Fuzzy conceptual quantifier, Fuzzy logic, Ordered weighted average (OWA)